

## CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE TROIS LACS SALÉS PERMANENTS DE LA VALLÉE D'OUED RIGH (SAHARA SEPTENTRIONAL, ALGÉRIE NORD-EST)

Ghouzala GOUASMA<sup>1,2</sup>, Mounia AMAROUAYACHE<sup>1\*</sup>, Hocine FRIHI<sup>1</sup> & Mohamed Hichem KARA<sup>1</sup><sup>1</sup> Laboratoire Bioressources Marines, Université d'Annaba Badji-Mokhtar, BP 230 Oued Kouba, Annaba 23008, Algérie<sup>2</sup> Université Mouhamed Chérif Messaadia-Souk Ahras, BP 1553, route d'Annaba, Souk Ahras, Algérie

\*Auteur correspondant. E-mail: m.derbal@yahoo.fr

**SUMMARY.**— *Physico-chemical characterization of three permanent saline lakes from Oued Righ valley (Northern Sahara, North-East Algeria).*— Characterized by its richness in wetlands, Oued Righ valley is located in the northeast of Algerian Sahara, where most of the water resources originate from the groundwater of two aquifers: the intermediate continental (CI) and the terminal complex (CT). These wetlands are of major interest because they are considered important for food for waterbirds, and in the future, they might be potential sites for Saharan aquaculture. Little is known about the hydrology of these areas, the few existing physico-chemical investigations only concern drillings and Oued Righ channel. Here, for the first time we provide physico-chemical data of three permanent saline lakes in this region: Ayata, Mégarine and Témachine Lakes. In order to characterize them, a monthly analysis of thirteen factors (temperature, electrical conductivity, salinity, pH, dissolved oxygen,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{++}$ ) was conducted between August 2009 and March 2010. The results show that Mégarine was the saltier with  $35.00 \pm 0.28 \text{ g.L}^{-1}$ . Ayata and Témachine are considered brackish and salty ( $11.56 \pm 0.93 \text{ g.L}^{-1}$  and  $16.45 \pm 0.35 \text{ g.L}^{-1}$ , respectively). Water temperature was similar in the three lakes and varied between  $15.70^\circ\text{C}$  in winter and  $34.25^\circ\text{C}$  in summer. Their pH was alkaline and between 7.23 and 8.05. Dissolved oxygen was low with a maximum of  $4.52 \text{ mg.L}^{-1}$  which corresponds to 50.51 % of saturation in Témachine. These lakes are highly mineralized; sulphate, chlorides and calcium were dominant. The analysis of Pearson's linear correlation matrix shows that temperature was the main factor influencing the changes in salinity, conductivity and dissolved oxygen. The higher salinity in Mégarine was due to the two salts KCl and NaCl, with a dominance of the first.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  originated from groundwater and adjacent soil evaporates, whereas  $\text{HCO}_3^-$  came from groundwater and adjacent soil calcite and/or dolomite, and from a biological source. The  $\text{Ca}^{++}$  was from calcite and/or dolomite. Globally, climate, groundwater, the adjacent soils and artificial drainage systems in Ayata and Témachine were the main factors controlling the physico-chemical functioning of these ecosystems.

**RÉSUMÉ.**— Les lacs Ayata, Mégarine et Témachine sont parmi les rares plans d'eaux salés et permanents du Sahara algérien. Il s'agit de dépressions de quelques hectares inondées par des puits artésiens creusés aux siècles derniers pour l'irrigation des palmeraies. Afin de les caractériser du point de vue physico-chimique, une analyse mensuelle de treize facteurs physico-chimiques (température, conductivité électrique, salinité, pH, oxygène dissous,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ ) a été effectuée entre août 2009 et mars 2010. Mégarine est le plus salé avec un maximum de  $35,00 \pm 0,28 \text{ g.L}^{-1}$ . Ayata et Témachine sont considérés comme saumâtres-salés. La température de l'eau est similaire dans les trois lacs et varie entre  $15,70$  et  $34,25^\circ\text{C}$ . Le pH est alcalin et varie entre 7,23 et 8,05. L'oxygène dissous est faible avec un maximum de  $4,52 \text{ mg.L}^{-1}$ , soit 50,51 % de saturation à Témachine. Les trois lacs sont fortement minéralisés avec une dominance des chlorures, des sulfates et du calcium. L'analyse de la matrice de corrélations linéaires de Pearson montre que la température est le principal facteur influençant les variations de la salinité, de la conductivité et de l'oxygène dissous. La salinité, plus élevée à Mégarine, est due principalement à deux sels KCl et NaCl, avec une dominance du premier. Les  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  proviennent des évaporites des nappes souterraines et des sols adjacents, alors que les  $\text{HCO}_3^-$  proviennent de la calcite et/ou de la dolomite des nappes et des sols traversés, ainsi que d'une source biologique. Le  $\text{Ca}^{++}$  provient de la calcite et/ou de la dolomite. Globalement, le climat, les apports en eaux des nappes souterraines, les sols adjacents et les systèmes d'évacuation artificiels placés dans les lacs Ayata et Témachine sont les principaux facteurs contrôlant le fonctionnement physico-chimique de ces écosystèmes.

Caractérisée par sa richesse en zones humides, la région d'Oued Righ est située dans le nord-est du Sahara septentrional algérien, dont les ressources hydriques proviennent essentiellement des eaux souterraines. Celles-ci sont contenues dans deux aquifères : le continental intercalaire (CI) et

le complexe terminal (CT) qui sont partagés entre l'Algérie, la Tunisie et la Lybie (Unesco, 1972). Ces ressources constituent l'un des plus vastes réservoirs hydriques du monde. La nappe du continental intercalaire s'étend sur 1 100 000 km<sup>2</sup>, avec une épaisseur moyenne de 350 m et des réserves évaluées à 20 000×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> d'eau. La nappe du complexe terminal s'étend sur 665 000 km<sup>2</sup>, avec une épaisseur moyenne de 342 m et des réserves d'eau évaluées à 11 000×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (Ould Baba Sy, 2005). Le CI a été rechargé en eau lors des périodes humides et plus froides du Pléistocène inférieur (Guendouz *et al.*, 2003).

La région d'Oued Righ, également connue sous le nom de Vallée d'Oued Righ, est une grande dépression topographique d'une superficie de 3000 km<sup>2</sup> (L = 150 km, l = 20 km), avec une pente d'environ 1 ‰ orientée nord-sud, dont l'altitude baisse progressivement de +100 m en amont au village d'El Goug à - 27 m en aval du chott Merouane (Dubost, 1991). Elle est riche en palmeraies de dattiers irriguées grâce à des forages dont le nombre s'est multiplié d'une manière drastique au cours de ces dernières décennies. L'excès d'eau salée résultant de l'irrigation est drainé vers des petits plans d'eau à l'origine, devenus des lacs permanents, à la différence des chotts et des sebkhas qui s'assèchent en été. Ces milieux particuliers sont sensiblement affectés, voir menacés par les apports importants provenant des eaux souterraines (Jellison *et al.*, 2008). Ces lacs permanents sont d'un intérêt majeur, puisqu'ils abritent une faune invertébrée constituant un véritable garde-manger pour les oiseaux aquatiques, dont 39 espèces recensées dans le lac Ayata (Houhamdi *et al.*, 2008). D'autre part, ils pourraient constituer, dans un proche avenir, des sites potentiels pour l'aquaculture saharienne, à savoir l'élevage de la crevette *Penaeus vannamei* Boone, 1931 (Direction de la pêche et des ressources halieutiques, Ouargla), quoique, du point de vue hydrobiologique, ces sites soient très peu connus. Les quelques investigations physico-chimiques menées dans la région concernent uniquement les eaux de forage (Unesco, 1972 ; Guendouz, 1985 ; Guendouz *et al.*, 2003 ; Tabouche & Achour, 2004 ; Chebbah & Allia, 2015) et celles du canal d'Oued Righ, un oued aménagé sur 150 km qui se déverse dans le chott Merouane (Hacini *et al.*, 2008). La littérature décrivant la physico-chimie de ce type de milieux dans d'autres régions arides du monde n'est pas pour autant fréquente (Hammer, 1986 ; Williams, 1986 ; De Dekker & Williams, 1988 ; Wahed *et al.*, 2015). Selon De Dekker & Williams (1988), les lacs modérément salés, peu profonds et permanents, sont les moins étudiés en comparaison des lacs hypersalés éphémères qui sont perçus comme plus particuliers de par leur biodiversité (Timms, 2005). Il est admis que la composition chimique inorganique des lacs salés et leur salinité sont déterminées par certains facteurs comme la géochimie du bassin de drainage, la nature chimique des eaux pluviales, la dissolution sélective et la précipitation des sels qui dépendent de l'évaporation et la contribution des eaux souterraines (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2012). La composition de l'eau de ces lacs varie de ce fait considérablement selon les régions du monde ou même localement.

Nous fournissons ici les premières données physico-chimiques de trois petits lacs permanents salés du Sahara. Les résultats obtenus permettront ainsi une caractérisation des eaux à des fins de gestion, et éventuellement, une meilleure connaissance de l'impact de leur nature sur la biodiversité dans les écosystèmes aquatiques sahariens.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### DESCRIPTION DES MILIEUX D'ÉTUDE

L'étude physico-chimique a été menée dans trois lacs salés et permanents du Sahara algérien (wilayas de Ouargla et El-Oued): le lac Ayata (position géographique : 33°29'46,33''N - 6°0'42,33''E, superficie : 20 ha, profondeur : 1,5 m, altitude : 42 m), le lac Mégarine (position géographique : 33°11'33,44''N - 6°5'3,47''E, superficie : 3,2 ha, profondeur : 4 m, altitude : 57 m) et le lac Témacine (position géographique : 33°1'19,12''N - 6°1'21,55''E, superficie : 4,2 ha, profondeur : 7 m, altitude : 76 m). La figure 1 montre le paysage et la disposition de ces milieux dans la région d'Oued Righ. Selon Berbrugger (1862), ils ont été définis comme des étangs artésiens ou Bhour (pluriel d'une mer), formés par les eaux des sources jaillissantes ou des puits artésiens, et qui sont actuellement alimentés par les eaux de drainage et de la

nappe libre, dont la salinité varie au nord de la région d'Oued Righ (Ayata) entre 2,36 et 14,78 g.L<sup>-1</sup> (Chebbah & Allia, 2015). Si l'on considère la classification de Jorgensen *et al.* (2012), qui tient compte de la profondeur et de la superficie, ces trois milieux peuvent être considérés comme des petits lacs. D'après les données de la station météorologique de Sidi Mahdi (Touggourt) et selon la classification de l'aridité d'après Lloyd (1986), le climat de la région est aride à hyperaride de type saharien, avec une période sèche et chaude qui s'étend du mois de mars au novembre et une autre humide et froide qui s'étend entre novembre et février. Les précipitations annuelles sont en moyenne de 70 mm.an<sup>-1</sup>, et janvier est le mois le plus pluvieux et le plus froid (minimum 4°C). Les taux d'évaporation sont très élevés, dépassant parfois les 300 mm.an<sup>-1</sup> en juillet où la température dépasse les 40°C à l'ombre. La région est caractérisée par des sols hétérogènes: calcaires, salins et gypseux (Boumaraf, 2013). Les trois lacs abritent une ichthyofaune supposée autochtone (Kara, 2012 ; Guezi & Kara, 2015 ; Zouakh *et al.*, sous presse), représentée par *Tilapia zillii* Gervais, 1848, *Hemichromis bimaculatus* Gill, 1862 et *Aphanius fasciatus* Valenciennes, 1821 (observations personnelles). Il est à noter que les lacs Ayata et Témacine sont équipés de systèmes d'évacuation (canalisation et trop-plein) des surplus des apports d'eau de drainage et d'eaux provenant de la nappe phréatique, qui se déversent dans le canal d'Oued Righ. Ces systèmes les rendent exoréiques en exportant continuellement une partie de leur eau, à l'opposé de Mégarine qui est endoréique.

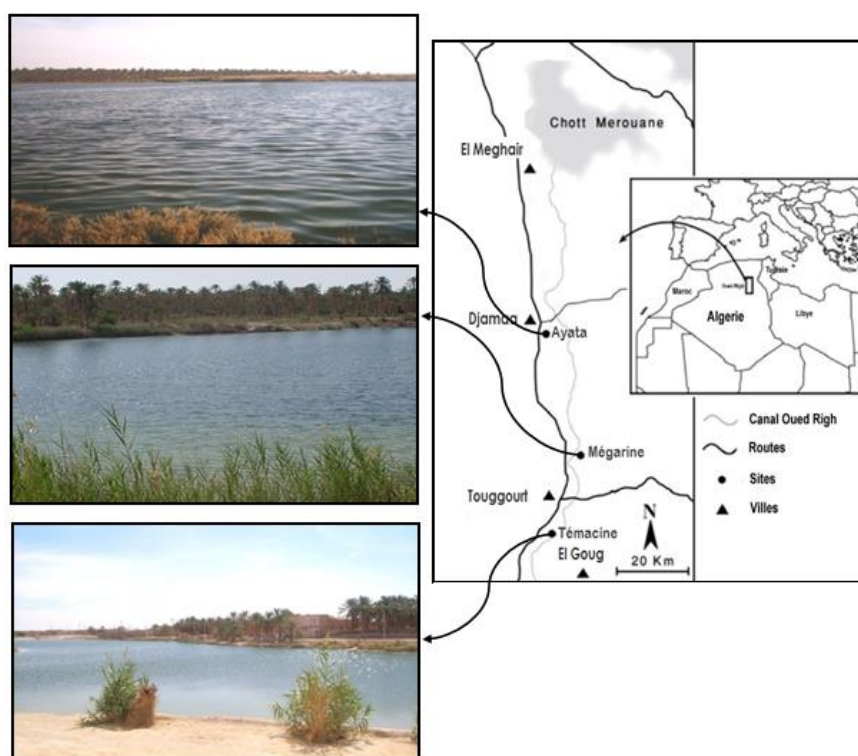


Figure 1.— Localisation de la zone d'étude et des trois lacs échantillonnés dans la région d'Oued Righ (Ayata, Mégarine et Témacine).

#### ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUE ET STATISTIQUE

L'analyse physico-chimique de l'eau a été réalisée mensuellement entre août 2009 et mars 2010. La température (T°C), la salinité (Sal), le pH, l'oxygène dissous (O.D) et la conductivité électrique K25 (C.E) ont été mesurés *in situ* avec un multi-paramètre de terrain de type Cyber Scan séries 600. Le dosage des nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), des chlorures (Cl<sup>-</sup>), des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>), des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), du sodium (Na<sup>+</sup>), du potassium (K<sup>+</sup>) et du calcium (Ca<sup>++</sup>) a été effectué au laboratoire selon la méthode de Rodier *et al.* (1996). Toutes les mesures et prélèvements d'échantillons ont été effectués dans deux stations différentes de chaque lac.

Afin de comprendre les variations temporelles des facteurs physico-chimiques ainsi que l'origine des ions dans trois lacs, la matrice de corrélation linéaire de Pearson a été réalisée entre les treize facteurs physico-chimiques étudiés pour chaque lac. Le logiciel Statistica 8 a été utilisé pour le traitement des données.

## RÉSULTATS

Le tableau I liste les valeurs extrêmes des facteurs physico-chimiques enregistrées dans chacun des trois lacs.

TABLEAU I

*Valeurs moyennes et extrêmes des facteurs physico-chimiques des trois lacs étudiés Ayata, Mégarine et Témacine*

Facteurs	lacs	Maximum	Minimum
Température (°C)	Ayata	31,05 ± 0,21	15,85 ± 0,63
	Mégarine	34,25 ± 0,35	15,70 ± 0,28
	Témacine	32,30 ± 0,28	15,70 ± 0,42
Salinité (g. L <sup>-1</sup> )	Ayata	11,56 ± 0,92	8,02 ± 0,07
	Mégarine	35,00 ± 0,28	9,49 ± 0,79
	Témacine	16,45 ± 0,35	12,18 ± 0,22
Conductivité (ms.cm <sup>-1</sup> )	Ayata	15,33 ± 2,33	12,40 ± 0,81
	Mégarine	53,06 ± 0,05	19,78 ± 0,31
	Témacine	22,14 ± 0,04	17,34 ± 0,22
pH	Ayata	8,03 ± 0,13	7,59 ± 0,09
	Mégarine	8,05 ± 0,08	7,23 ± 0,00
	Témacine	7,94 ± 0,10	7,37 ± 0,34
Oxygène dissous (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	3,04 ± 0,09	2,47 ± 0,05
	Mégarine	2,80 ± 0,08	2,41 ± 0,03
	Témacine	4,52 ± 0,17	3,09 ± 0,25
Oxygène dissous (%)	Ayata	41,03 ± 0,07	27,73 ± 0,35
	Mégarine	41,47 ± 0,28	28,89 ± 0,55
	Témacine	50,71 ± 0,98	42,36 ± 0,34
Nitrites (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	0,08 ± 0,01	0,03 ± 0,00
	Mégarine	0,13 ± 0,11	0,04 ± 0,01
	Témacine	0,07 ± 0,07	0,03 ± 0,01
Nitrates (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	9,52 ± 0,56	2,00 ± 0,14
	Mégarine	7,11 ± 0,27	2,40 ± 0,99
	Témacine	9,65 ± 1,63	2,25 ± 0,07
Chlorures (g. L <sup>-1</sup> )	Ayata	3,97 ± 0,04	2,16 ± 0,54
	Mégarine	18,79 ± 1,00	9,97 ± 0,01
	Témacine	7,04 ± 0,06	5,66 ± 0,00
Sulfates (g. L <sup>-1</sup> )	Ayata	2,79 ± 0,10	1,88 ± 0,13
	Mégarine	4,66 ± 0,05	2,96 ± 0,05
	Témacine	4,69 ± 0,33	2,23 ± 0,00
Bicarbonates (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	201,47 ± 0,10	171,37 ± 0,35
	Mégarine	429,75 ± 0,63	377,54 ± 0,61
	Témacine	562,25 ± 3,01	305,40 ± 6,70
Sodium (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	38,48 ± 1,99	34,45 ± 0,62
	Mégarine	96,34 ± 0,48	79,59 ± 0,82
	Témacine	54,11 ± 1,39	41,97 ± 0,27
Potassium (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	51,26 ± 1,51	34,93 ± 2,55
	Mégarine	359,25 ± 4,30	250,58 ± 0,61
	Témacine	94,04 ± 0,86	81,13 ± 1,36
Calcium (mg. L <sup>-1</sup> )	Ayata	423,64 ± 4,87	398,52 ± 0,38
	Mégarine	626,10 ± 7,20	575,32 ± 0,18

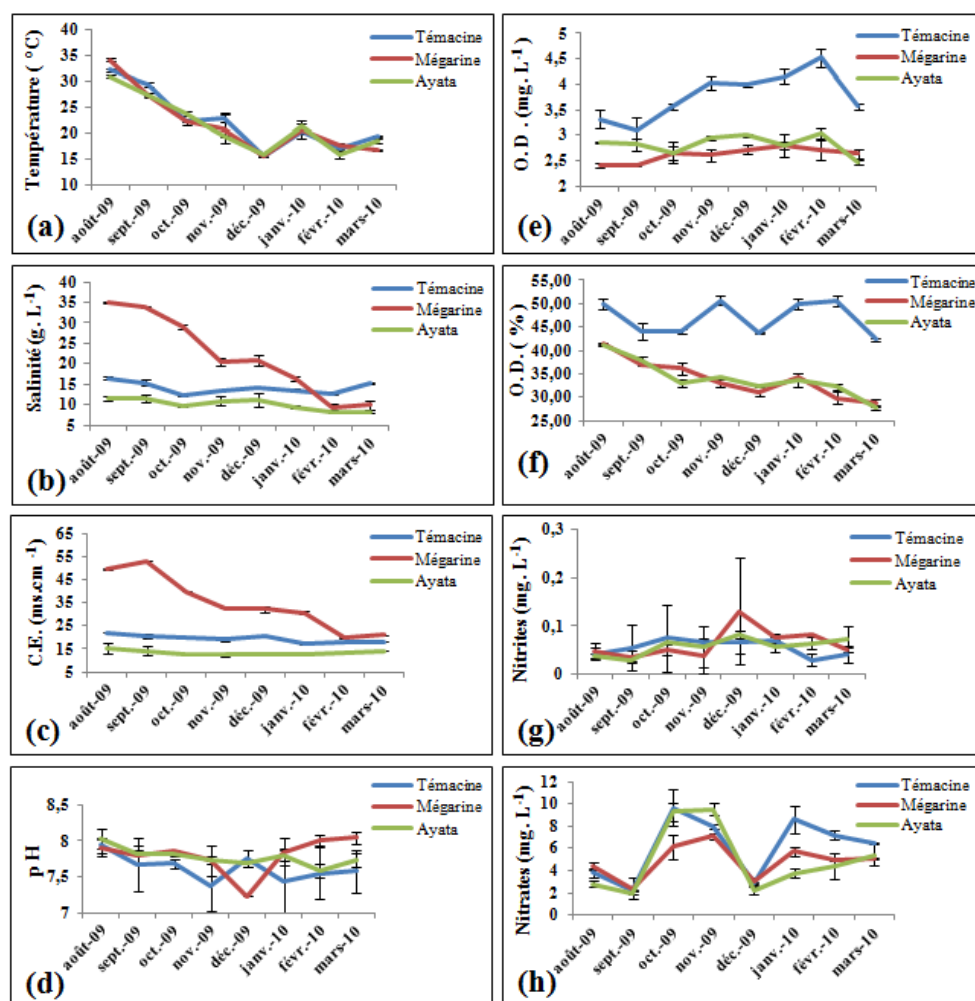


Figure 2.— Évolution spatiotemporelle des facteurs physico-chimiques dans les lacs Ayata, Mégarine et Témacine : a température, b salinité, c conductivité électrique, d pH, e oxygène dissous, f taux de saturation, g nitrites, h nitrates.

Les variations mensuelles de la température de l'eau sont illustrées dans la figure 2a. Dans les trois lacs, les valeurs sont très proches avec un maximum en août et des minima en décembre et février. La figure 2b montre les fluctuations mensuelles de la salinité. Elle est plus ou moins stable dans les lacs Ayata et Témacine avec des valeurs moyennes comprises entre  $8,02 \pm 0,07$  et  $16,45 \pm 0,35$  g.L<sup>-1</sup> et une gamme plus large à Mégarine entre  $9,49 \pm 0,28$  et  $35,00 \pm 0,79$  g.L<sup>-1</sup>. La conductivité électrique suit la salinité (Fig. 2c). Les fluctuations mensuelles les plus importantes sont observées dans le lac Mégarine avec un maximum enregistré en période chaude ( $53,06 \pm 0,05$  ms.cm<sup>-1</sup>). Les valeurs du pH des trois lacs sont de même gamme : pH alcalin, avec de faibles fluctuations mensuelles (Fig. 2d). Les teneurs en oxygène dissous sont faibles (Fig. 2e), le maximum de  $4,52 \pm 0,17$  mg.L<sup>-1</sup>, qui correspond à  $50,51 \pm 1,18$  % de saturation, étant enregistré en hiver dans le lac Témacine où les fluctuations mensuelles sont les plus marquées. La figure 2f montre les taux de saturation d'oxygène dissous qui ont tendance à diminuer en période froide dans les lacs Ayata et Mégarine. Les concentrations en nitrites sont généralement faibles durant la période d'étude (Fig. 2g); les valeurs les plus élevées ( $0,13 \pm 0,11$  mg.L<sup>-1</sup>) sont enregistrées en période froide dans le lac Mégarine. De même, les valeurs les plus élevées en nitrates sont

enregistrées en période froide à Ayata et Témacine avec environ 9 mg.L<sup>-1</sup>. Des minima sont enregistrés en septembre et décembre dans les trois lacs (Fig. 2h).

Les trois lacs sont fortement minéralisés avec une dominance des chlorures, des sulfates et du calcium. Les chlorures dans le lac Mégarine atteignent  $18,79 \pm 1,00$  g.L<sup>-1</sup> en période chaude, valeur bien plus élevée que celles enregistrées à Ayata et Témacine (Fig. 3a). D'importantes concentrations en sulfates sont enregistrées à Mégarine et Témacine avec plus de 4 g.L<sup>-1</sup>. Les principales fluctuations mensuelles sont observées à Mégarine et à Témacine alors qu'à Ayata, elles restent cependant faibles (Fig. 3b). Les bicarbonates sont plus importants à Témacine avec un maximum de  $562,00 \pm 3,01$  mg.L<sup>-1</sup> en août. Les valeurs sont plutôt stables à Ayata et Mégarine (Fig. 3c). De même, les concentrations en sodium sont stables et les valeurs les plus élevées sont observées à Mégarine (Fig. 3d). Dans ce même lac, les concentrations en potassium sont visiblement plus élevées ( $359,25 \pm 4,30$  mg.L<sup>-1</sup>) qu'à Témacine ( $94,04 \pm 0,86$  mg.L<sup>-1</sup>) et à Ayata ( $51,26 \pm 1,51$  mg.L<sup>-1</sup>) (Fig. 3e). Comme pour le sodium et le potassium, les plus fortes concentrations en calcium sont, par ordre décroissant, enregistrées à Mégarine, puis à Témacine et enfin à Ayata (Fig. 3f).

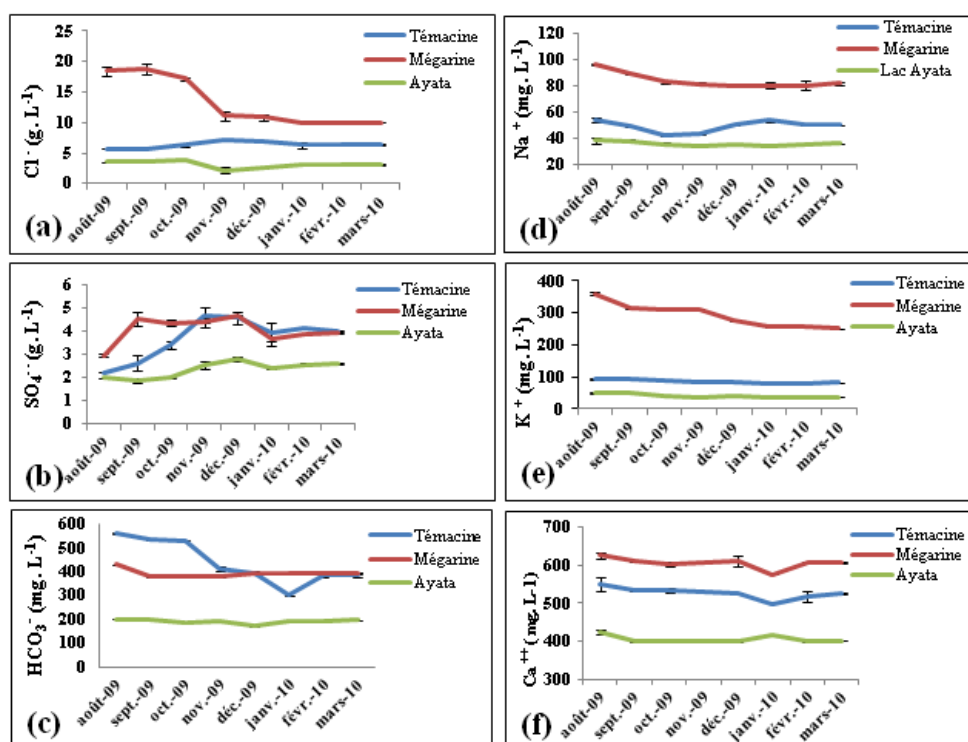


Figure 3.— Évolution spatiotemporelle des facteurs physico-chimiques dans les lacs Ayata, Mégarine et Témacine: a chlorures, b sulfates, c bicarbonates, d calcium, e sodium et f potassium.

Les tableaux II, III et IV montrent les matrices de corrélations de Pearson des treize paramètres déterminées pour les trois lacs étudiés. Au seuil de 5 %, le coefficient de corrélation critique est de 0,71 pour Ayata et Témacine et de 0,75 pour Mégarine. L'examen de la matrice de corrélations montre qu'il existe des corrélations positives et d'autres négatives. Globalement, la température est le paramètre qui est le plus souvent corrélé aux autres variables dans les trois lacs étudiés. La salinité et la conductivité sont corrélées significativement aux ions des évaporites. Les ions des évaporites sont corrélés entre eux. De même, les ions de calcites et/ou dolomites sont corrélés significativement entre eux.



TABLEAU II

Matrice des corrélations linéaires de Pearson entre les facteurs physico-chimiques étudiés dans le lac Ayata

	T(°C) A	Sal A	pH A	Oxy A	CE A	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> A	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> A	Cl <sup>-</sup> A	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> A	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> A	Na <sup>+</sup> A	K <sup>+</sup> A	Ca <sup>++</sup> A
T(°C) A	1,00												
Sal A	0,56	1,00											
pH A	0,92	0,56	1,00										
Oxy A	-0,21	0,32	-0,26	1,00									
CE A	0,61	0,14	0,57	-0,15	1,00								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> A	-0,82	-0,48	-0,61	-0,07	-0,58	1,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> A	-0,19	-0,23	-0,18	-0,24	-0,55	0,29	1,00						
Cl <sup>-</sup> A	0,59	-0,08	0,45	-0,45	0,46	-0,37	-0,18	1,00					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> A	-0,91	-0,40	-0,71	0,23	-0,44	0,81	0,04	-0,75	1,00				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> A	0,65	-0,07	0,47	-0,37	0,69	-0,77	-0,03	0,45	-0,65	1,00			
Na <sup>+</sup> A	0,86	0,42	0,73	-0,24	0,87	-0,77	-0,44	0,66	-0,78	0,70	1,00		
K <sup>+</sup> A	0,86	0,69	0,75	-0,03	0,74	-0,76	-0,40	0,49	-0,76	0,52	0,94	1,00	
Ca <sup>++</sup> A	0,58	0,21	0,76	0,02	0,47	-0,37	-0,35	0,20	-0,31	0,29	0,36	0,32	1,00

TABLEAU III

Matrice des corrélations linéaires de Pearson entre les facteurs physico-chimiques étudiés dans le lac Mégarine

	T(°C) M	Sal M	pH M	Oxy M	CE M	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> M	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> M	Cl <sup>-</sup> M	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> M	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> M	Na <sup>+</sup> M	K <sup>+</sup> M	Ca <sup>++</sup> M
T(°C) M	1,00												
Sal M	0,83	1,00											
pH M	0,23	-0,20	1,00										
Oxy M	-0,81	-0,75	-0,15	1,00									
CE M	0,84	0,98	-0,17	-0,77	1,00								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> M	-0,56	-0,37	-0,66	0,60	-0,40	1,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> M	-0,17	-0,31	0,38	0,40	-0,39	-0,34	1,00						
Cl <sup>-</sup> M	0,84	0,94	0,07	-0,81	0,92	-0,49	-0,33	1,00					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> M	-0,53	-0,04	-0,55	0,18	-0,04	0,20	-0,18	-0,10	1,00				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> M	0,60	0,27	0,16	-0,38	0,24	0,04	-0,19	0,27	-0,86	1,00			
Na <sup>+</sup> M	0,96	0,78	0,23	-0,88	0,79	-0,49	-0,32	0,82	-0,55	0,69	1,00		
K <sup>+</sup> M	0,87	0,91	-0,07	-0,79	0,86	-0,48	-0,07	0,85	-0,23	0,42	0,83	1,00	
Ca <sup>++</sup> M	0,41	0,44	-0,11	-0,71	0,37	-0,10	-0,37	0,49	-0,10	0,46	0,59	0,60	1,00

TABLEAU IV

Matrice des corrélations linéaires de Pearson entre les facteurs physico-chimiques étudiés dans le lac Témacine

	T(°C) T	Sal T	pH T	Oxy T	CE T	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> T	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> T	Cl <sup>-</sup> T	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> T	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> T	Na <sup>+</sup> T	K <sup>+</sup> T	Ca <sup>++</sup> T
T(°C) T	1,00												
Sal T	0,61	1,00											
pH T	0,46	0,55	1,00										
Oxy T	-0,77	-0,64	-0,56	1,00									
CE T	0,68	0,56	0,81	-0,69	1,00								
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> T	-0,07	-0,38	-0,21	-0,06	0,08	1,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> T	-0,35	-0,76	-0,60	0,48	-0,62	0,27	1,00						
Cl <sup>-</sup> T	-0,76	-0,54	-0,59	0,68	-0,43	0,33	0,40	1,00					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> T	-0,86	-0,57	-0,68	0,76	-0,61	0,23	0,39	0,97	1,00				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> T	0,77	0,36	0,70	-0,78	0,83	-0,05	-0,37	-0,65	-0,79	1,00			
Na <sup>+</sup> T	0,11	0,59	0,30	0,05	-0,03	-0,47	-0,44	-0,39	-0,28	-0,25	1,00		
K <sup>+</sup> T	0,87	0,47	0,71	-0,82	0,89	0,06	-0,44	-0,69	-0,83	0,97	-0,13	1,00	
Ca <sup>++</sup> T	0,64	0,49	0,73	-0,69	0,89	-0,16	-0,44	-0,39	-0,57	0,89	-0,22	0,84	1,00

## DISCUSSION

Les variations mensuelles de la température de l'eau des trois lacs étudiés suivent la température atmosphérique (Wetzel, 1983). Selon Delince (1992), ce facteur déterminant agit sur la solubilité des sels et des gaz qui, à leur tour, agissent sur l'ensemble de l'écosystème. En effet, la matrice de corrélation linéaire de Pearson des facteurs physico-chimiques dans le lac Mégarine indique que la température est positivement corrélée à la salinité et à la conductivité ainsi qu'aux ions de chlorures, de sodium et de potassium qui gèrent ces deux paramètres. Elle est, par contre, négativement corrélée à l'oxygène dissous en période chaude. Ceci montre l'important effet de la température sur tous ces facteurs, en particulier dans ce lac.

La salinité de l'eau est différente dans chacun des trois lacs avec des variations mensuelles plus marquées à Mégarine. Selon la classification de Stuyfzand (1989), Ayata et Témachine sont classés dans la même gamme d'eau saumâtre salée et Mégarine dans la gamme d'eau salée. Les différences enregistrées entre les trois lacs seraient liées au système d'évacuation artificiel, placé de manière différente dans le lac Ayata et dans le lac Témachine, et qui permet le renouvellement continu des apports d'eau en réduisant la concentration des sels par évaporation. D'autres facteurs peuvent également influencer ce paramètre, tels que le contexte géologique particulier de chacun des trois lacs, puisque la région est caractérisée par une hétérogénéité de la nature des sols (Boumaaraf, 2013). D'autre part, les apports en eaux d'irrigation sont originaires des nappes souterraines différemment minéralisées (Guendouz *et al.*, 2003 ; Tabouche & Achour, 2004). Selon Schoeller (1948), pour la famille chlorurée et sulfatée sodi-calcique et magnésienne, la lithologie de l'aquifère fine et imperméable rend la circulation de l'eau difficile, induisant un long contact entre l'eau et la roche, ce qui explique la minéralisation de ces nappes souterraines. Les fortes fluctuations mensuelles de la salinité dans le lac Mégarine sont liées à l'intensité d'évaporation, qui est plus importante en période chaude, et à l'absence de systèmes d'évacuation. Comme indiqué par la matrice de corrélation, la salinité dans le lac Mégarine est due à deux sels, le NaCl et le KCl, qui sont des évaporites à l'origine. Comme pour la température, les organismes aquatiques ont chacun des exigences propres, d'où l'importance du suivi de ce facteur (Hammer, 1986).

Selon Hade (2003), la conductivité serait influencée par divers facteurs naturels et anthropiques comme la géologie du bassin versant, la température, l'évaporation de l'eau et les variations du débit des apports qui alimentent les lacs et les apports d'eau d'origine domestique. Dans les trois lacs étudiés, la conductivité est influencée, selon la matrice de corrélation, par les facteurs climatiques tels que la température et l'évaporation, la géologie des bassins versants et les apports en eaux souterraines différemment minéralisées.

Les valeurs du pH des trois lacs sont dans la même gamme, pH alcalin. L'environnement physique est le principal facteur qui influence le pH d'un lac, mais aussi, un lit de roche calcaire procure à l'eau une propriété basique. Un pH entre 6,5 et 8,5, correspond à la zone de tolérance de la majorité des organismes vivants. Lorsque le changement du pH est significatif, ceci entraîne généralement des modifications de la faune et de la flore existantes (Hade, 2003).

L'oxygène de l'eau est un facteur déterminant pour la distribution et la survie des espèces (Davis, 1975). Selon Aminot & Chaussepied (1983), la quantité d'oxygène d'un écosystème aquatique dépend des facteurs naturels comme la température, la salinité, la pression atmosphérique et hydrostatique, la turbulence, les courants, les remontées d'eau et les processus biologiques. Il est admis que des teneurs inférieures à 4 mg.L<sup>-1</sup> indiquent une eau de mauvaise qualité ou polluée (Wetzel, 1983). Le taux de saturation d'oxygène des trois lacs étudiés est faible (inférieur à 51 % de saturation), bien qu'ils ne soient soumis à aucune source de pollution. Ces faibles teneurs en oxygène dissous seraient dues à la salinité et à la température élevées qui empêchent sa dissolution. En plus de ces deux paramètres importants, les faibles taux de saturation en oxygène dissous dans les trois lacs seraient également liés à la richesse en matières organiques,



le sédiment du fond étant de couleur noirâtre. Le lac Témacine, bien qu'il ne soit pas le moins salé, est plus oxygéné que les deux autres, étant le plus exposé au vent, en plus de son système d'évacuation qui permet le renouvellement de l'eau. Il est à noter que le taux de saturation de l'oxygène dissous a tendance à diminuer dans les lacs Ayata et Mégarine en période froide, probablement à cause d'une plus importante consommation par les fortes densités de zooplancton (observations personnelles) et la photosynthèse, plus importante en été.

Les faibles concentrations en nitrites durant la période d'étude peuvent s'interpréter par le fait que ceux-ci soient une forme intermédiaire qui a tendance à s'oxyder en nitrates, ou à se réduire en ammonium (Dussart, 1966). Les valeurs des nitrates sont celles qui fluctuent le plus dans notre étude, avec des minimas en septembre et en décembre dans les trois lacs. Dalsgaard & Bak (1994) ont montré que la réduction des nitrates en milieu anoxique avait comme stimulant les sulfates. Romero *et al.* (2002) ont conclu dans leur étude que les valeurs maximales et minimales des nitrates dans le lac Pamvotis en Grèce seraient liées à une faible biomasse algale et à un bloom algal respectivement. La matrice de corrélation a montré des corrélations positives de nitrites et de sulfates durant le mois de décembre à Ayata. Les valeurs maximales de nitrates enregistrées dans les deux lacs exoréiques Ayata et Témacine peuvent être considérées comme faibles (Camargo *et al.*, 2005). Ces auteurs ont rapporté qu'un taux maximal de 20 mg.L<sup>-1</sup> était généralement acceptable pour les poissons et les invertébrés marins alors, qu'en eau douce, le seuil ne devrait pas dépasser 2 mg.L<sup>-1</sup>.

Les fortes concentrations des ions chlorure et sulfate par rapport aux autres ions s'interprètent, comme pour la salinité et la conductivité, par les apports des eaux d'irrigation de la nappe souterraine d'origine plus riche en chlorures et en sulfates (Tabouche & Achour, 2004) et qui traversent des sols salins. Les importantes fluctuations mensuelles des chlorures enregistrées dans le lac Mégarine sont liées à l'intensité d'évaporation du fait qu'il n'exporte pas ses eaux. Les corrélations positives entre les chlorures et les sulfates à Témacine signifient une origine salifère commune de ces ions. Les fluctuations des sulfates sont en relation avec l'oxygène dissous, comme l'indique la matrice de corrélation à Témacine puisqu'il existe une corrélation positive de ces deux facteurs. Ceci montre l'implication des sulfates dans les processus de biodégradation en milieu pauvre en oxygène démontrée par Marty *et al.* (1990). En période chaude les concentrations sont faibles, suite à l'intervention de ces ions dans la dégradation de la matière organique puisque les teneurs en oxygène sont faibles.

Les intervalles de concentration des bicarbonates entre les trois lacs seraient liés, en plus de l'aménagement, au type de sol traversé, ainsi qu'à la lithologie de la nappe exploitée. La corrélation positive des bicarbonates au calcium dans le lac Témacine pourrait signifier qu'ils proviennent de la calcite et/ou de la dolomite (Meng & Maynard, 2001). À cela s'ajoute une autre source biologique qui est la formation des bicarbonates comme sous-produits de la biodégradation de la matière organique par les bactéries sulfato-réductrices en conditions d'anaérobiose (Canfield *et al.*, 1993).

Les concentrations en sodium, en potassium et en calcium sont plus élevées à Mégarine par rapport aux deux autres lacs. Les fluctuations mensuelles de sodium et de calcium sont cependant faibles, probablement à cause de la sursaturation des eaux par ces éléments. Selon Tabouche & Achour (2004), les valeurs de sodium sont plus importantes dans les eaux des nappes souterraines que dans celles des lacs ; ceci pourrait s'expliquer par le phénomène d'échanges de base entre l'eau et les sols lors de drainages, où les sols prennent le sodium et libèrent le calcium. Les fluctuations mensuelles de potassium sont plus marquées à Mégarine et suivent celles des chlorures puisqu'elles seraient de même source selon la matrice de corrélation. En termes de composition ionique, les trois lacs étudiés ont une dominance mixte des anions chlorures et sulfates et une dominance des cations calcium. Cette forte concentration en calcium est probablement originaire des sols calcaires traversés par les eaux de drainage originaires des nappes

souterraines riches en calcium où se produit un échange de base des ions sodium de l'eau contre ceux de calcium des sols calcaires.

Hammer (1986) divise les lacs salés du monde en fonction de la prédominance des carbonates, des chlorures et des sulfates ; les carbonatés se trouvent en Afrique, les chlorurés se trouvent sur tous les continents, alors que les sulfatés se trouvent en Amérique du nord et en Russie de l'Est. Certains de ces lacs ont une dominance mixte des anions, le sous-type carbonaté chlorique et le sulfaté chlorique qui est le moins abondant. Selon les cations, il existe trois types dominants (sodium, magnésium et calcium) avec une prédominance du sodium. En partant de cette répartition, nos lacs, dominés par les chlorures, les sulfates et le calcium, peuvent être considérés comme relativement rares.

## CONCLUSION

Il ressort que, même si les trois lacs étudiés sont de même type, chloruré et sulfaté calcique, des différences entre les facteurs physico-chimiques s'observent, surtout dans le lac Mégarine dépourvu de systèmes d'évacuation. Les eaux de la nappe souterraine différemment minéralisée et le type de sols adjacents qui sont de composition variable, saline, calcaire ou gypseuse, sont également des facteurs faisant la différence entre ces trois lacs. Le lac Mégarine, étant fermé, est le plus salé par concentration, avec deux sels dominants, le KCl et le NaCl. Les lacs Ayata et Témacine, pourvus de systèmes d'évacuation des apports en surplus, sont les moins salés. Les principaux phénomènes responsables des fluctuations mensuelles enregistrées dans les trois lacs sont les conditions climatiques telles que la température et l'évaporation, ainsi que les processus biologiques. Ces trois milieux sont pauvres en oxygène à cause des températures relativement élevées d'une part, et de la richesse en matière organique d'autre part. Ceci n'est pas en faveur des activités aquacoles envisagées. En effet, les ensemencements en 2003 (DPRH, Ouargla) du tilapia *Tilapia nilotica* Linnaeus, 1758 n'ont pas abouti, puisqu'aucun individu de cette espèce n'a été observé ces dernières années (observations personnelles). Seules les espèces autochtones de poissons ont résisté à ces conditions.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes, des études plus détaillées sur la physico-chimie, incluant le magnésium et les différentes formes de phosphore pour étudier l'état trophique, sont à envisager dans le futur. La faune et la flore aquatiques sont à considérer par la même occasion. Une attention particulière doit être portée à l'éventuelle augmentation de la salinité dans le temps qui pourrait constituer une sérieuse menace pour la biodiversité.

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre gratitude aux trois relecteurs anonymes pour leurs constructives remarques et suggestions sur de précédentes versions de notre texte.

## RÉFÉRENCES

- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. (1983).— *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Centre national pour l'exploitation des Océans (Cnexo), Brest.
- BERBRUGGER, A. (1862).— *Les puits artésiens des oasis méridionales de l'Algérie*. Bastide.
- BOUMARAF, B. (2013).— *Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara nord oriental, Algérie*. Thèse de doctorat, Université Reims Champagne.
- CAMARGO, J.A., ALONSO, A., & SALAMANCA, A. (2005).— Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. *Chemosphere*, 58: 1255-1267.

- CANFIELD, D.E., THAMDRUP, B., & HANSEN, J.W. (1993).— The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 3867-3883.
- CHEBBAH, M. & ALLIA, Z. (2015).— Geochemistry and hydrogeochemical process of groundwater in the Souf valley of Low Septentrional Sahara, Algeria. *Afr. J. Envir. Sci. Technol.*, 9: 261-273.
- DALSGAARD, T. & BAK, F. (1994).— Nitrate reduction in a sulfate-reducing bacterium, *Desulfovibrio desulfuricans*, isolated from rice paddy soil: sulfide inhibition, kinetics, and regulation. *Appl. Envir. Microbiol.*, 60: 291-297.
- DAVIS, J.C. (1975).— Minimal dissolved oxygen requirements of aquatic life with emphasis on Canadian species: a review. *J. Fisher. Board Canada*, 32: 2295-2332.
- DE DECKKER, P. & WILLIAMS, W.D. (1988).— Physico-chemical limnology of eleven, mostly saline permanent lakes in western Victoria, Australia. *Hydrobiologia*, 162: 275-286.
- DELINCE, G. (1992).— *The ecology of the fish pond ecosystem with special references to Africa*. Kluwer Academic, London.
- DUBOST, D. (1991). — *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis sahariennes algériennes*. Thèse Doctorat, Université François Rabelais, Tours.
- DUSSART, B. (1966).— *Limnologie. L'étude des eaux continentales*. Gauthier Villars, Paris.
- GUENDOUZ, A. (1985).— *Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est septentrional d'Algérie*. Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Université Paris Sud, Orsay.
- GUENDOUZ, A., MOULLA, A.S., EDMUNDS, W.M., ZOUARI, K., SHAND, P. & MAMOU, A. (2003).— Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complex Terminal aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogeol. J.*, 11: 483-495.
- GUEZI, R. & KARA, M.H. (2015).— Age, growth and reproduction of the endangered jewelfish *Hemichromis bimaculatus* in the valley of Oued Righ (South-eastern Algeria). *Cybium*, 39: 301-307.
- HACINI, M., OELKERS, E.H., KHERICI, N. (2008).— Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 1583-1597.
- HADE, A. (2003).— *Nos lacs, les connaître pour mieux les protéger*. Editions Fides.
- HAMMER, U.T. (1986).— *Saline lake ecosystems of the world*. Springer Science and Business Media, Berlin.
- HOUHAMDI, M., BENSACI, T., NOUIDJEM, Y., BOUZEGAG, A., SAHEB, M. & SAMRAOUI, B. (2008).— Éco-éthologie du Flamant rose (*Phoenicopterus roseus*) hivernant dans les oasis de la Vallée de l'Oued Righ (Sahara algérien). *Aves* 45:15-27.
- JELLISON, R., WILLIAMS, W.D., TIMMS, B., ALCOCER, J. & ALADIN, N.V. (2008).— *Salt lakes: values, threats and future*. Pp 94-110 in: N.V.C. Polunin (ed.). *Aquatic Ecosystems. Trends & global prospects*. Cambridge University Press, Cambridge.
- JORGENSEN, S.E., TUNDISI, J.G. & TUNDISI, T.M. (2012).— *Handbook of inland aquatic ecosystem management*. CRC Press.
- KARA, M.H. (2012).— Freshwater fish diversity in Algeria with emphasis on alien species. *Eur. J. Wildl. Res.*, 58: 243-253.
- LLOYD, J.W. (1986).— A review of aridity and groundwater. *Hydrol. Processes*, 1: 63-78.
- MARTY, D., ESNAULT, G., CAUMETTE, P., RANAIVOSON-RAMBELOARISOA, E., & BERTRAND, J.C. (1990).— Dénitrification, sulfato-réduction et méthanogenèse dans les sédiments superficiels d'un étang saumâtre méditerranéen. *Oceanol. Acta*, 13: 199-210.
- MENG, S.X. & MAYNARD, J.B. (2001).— Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo state, Brazil. *J. Hydrol.*, 250: 78-97.
- OULD BABA SY, M. (2005).— *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional*. Thèse de doctorat en Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie.
- RODIER, J., BAZIN, C., BROUTIN, J.P., CHAMBON, P., CHAMPSAUR, H. & RODI, L. (1996).— *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer*. Dunod, Paris.
- ROMERO, J., KAGALOU, I., IMBERGER, J., HELA, D., KOTTI, M., BARTZOKAS, A., ALBANIS, T., EVMIRIDES, N., KARKABOUNAS, S., PAPAGIANNIS, J. & BITHAVA, A. (2002).— Seasonal water quality of shallow and eutrophic Lake Pamvotis, Greece: implications for restoration. *Hydrobiologia*, 474: 91-105.
- SCHOELLER, H. (1948).— *Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une nappe*. Assemblée générale d'Oslo de l'Union géodésique et géophysique internationale.
- STUYFZAND, P.J. (1989).— A new hydrochemical classification of water types. Regional characterization of water quality. Proceedings of the Baltimore Symposium. *Iahs Publ.* 182: 89-99.
- TABOUCHE, N. & ACHOUR, S. (2004).— Étude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional Algérien. *Larhyss Journal*, 03: 99-113.
- TIMMS, B.V. (2005).— Salt lakes in Australia: present problems and prognosis for the future. *Hydrobiologia*, 552: 1-15.
- TUNDISI, J.G. & MATSUMURA-TUNDISI, T. (2012).— *Limnology*. CRC Press.

- UNESCO (1972).— *Étude des ressources en eau du Sahara Septentrional : Captage et utilisation des eaux souterraines*. Plaquette 7, Unesco.
- WAHED, M.S.A., MOHAMED, E.A., EL-SAYED, M.I., M'NIF, A. & SILLANPÄÄ, M. (2015).— Hydrogeochemical processes controlling the water chemistry of a closed saline lake located in Sahara desert: Lake Qarun, Egypt. *Aquat. Geochem.*, 21: 31-57.
- WETZEL, R.G. (1983).— *Limnology*. Saunders, Philadelphia.
- WILLIAMS, W.D. (1986).— Limnology, the study of inland waters: a comment on perceptions of studies of salt lakes, past and present. Pp 471-483 in: P. De Deckker & W.D. Williams (eds). *Limnology in Australia*. CSIRO Australia, Melbourne.
- ZOUAKH, D.E., CHEBEL, F., BOUAZIZ, A. & KARA M.H. (2016).— Reproduction, age and growth of *Tilapia zillii* (Pisces, Cichlidae) in Oued Righ wetland (southeast Algeria). *Cybium* (sous presse).